高压开放流动体系中方解石和蒙脱石的溶解试验研究

赵宇[1*]，蒋宇[1,2]

1．中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所，四川 成都 610041；

2．中国科学院大学，北京 100049；

（通讯作者：赵宇，Email：zhaoyu@imde.ac.cn）

摘要：水-岩（土）化学作用（CWRI）在降雨诱发的滑坡孕育过程中具有特殊意义，一方面雨水溶蚀作用会对岩土体造成损伤，另一方面会生成大量次生黏土矿物。溶蚀损伤和次生黏土矿物在滑面的富集致使滑面抗剪强度降低，是滑面形成的主要原因。本文利用高压开放流动体系模拟滑面所处的力学化学环境，以滑面常见矿物——方解石和蒙脱石为例，研究滑面矿物溶蚀反应的速率和控制因素，从而揭示滑面形成机理及其过程动力学/力学化学效应。实验结果显示：1）矿物溶蚀速率随着压力的增大而增大，但不同矿物对于压力的响应不同；2）随着溶液的 pH 值降低，H+活度逐渐增大，矿物溶溶蚀速率显著增加；3）矿物溶蚀的流速效应十分复杂，与压强、pH 和矿物种类均有关；4）矿物溶蚀时并不满足化学计量关系。上述实验结果揭示：滑面上溶蚀作用与土体的损伤和滑面强度的演化紧密相关，滑面深度、矿物种类以及地下水的酸碱度共同决定着滑面上矿物溶蚀速率和转化特点。滑面深度的增加或易溶蚀矿物的增加，加速滑面的的形成过程。地下水的酸度增加会加速水-岩反应速率，从而加快滑面强度降低的速度。

关键词：矿物溶解、高压开放流动体系、方解石、蒙脱石

Experimental study on the dissolution of calcite and montmorillonite in high pressure open flow system

Yu Zhao[1,*] Yu Jiang[1,2]

1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

(Corresponding Author, Yu Zhao, Email：zhaoyu@imde.ac.cn)

Abstract: Water-rock (soil) chemical interaction (CWRI) is of special significance in the formation process of rainfall induced landslide. On the one hand, rain erosion will cause damage to rock and soil mass, on the other hand, it will generate a large number of secondary clay minerals. The main reason for the formation of the sliding surface is the decrease of the shear strength of the sliding surface caused by the corrosion damage and the

*本文系国家自然科学基金面上项目“滑面强度演化微-宏观多尺度实验研究”（项目号：41671116）的研究成果之一。

enrichment of secondary clay minerals in the sliding surface. In this paper, a high pressure open flow system is used to simulate the chemo-mechanical environment of the sliding surface. Taking calcite and montmorillonite as examples, the rate and controlling factors of the dissolution reaction of the minerals on the sliding surface are studied, so as to reveal the formation mechanism of the sliding surface and its chemo-mechanical process. The results show that: 1) the dissolution rate of minerals increases with the increase of pressure, but the response of different minerals to pressure is different; 2) with the decrease of pH value of solution, the H + activity increases gradually, and the dissolution rate of minerals increases significantly; 3) the flow rate effect of mineral dissolution is very complex, which is related to pressure, pH and mineral species; 4) the dissolution of minerals does not meet the stoichiometric relationship. The above experimental results show that the dissolution on the sliding surface is closely related to the damage of soil and the evolution of the strength of the sliding surface. The depth of the sliding surface, the types of minerals and the acidity and alkalinity of groundwater jointly determine the dissolution rate and transformation characteristics of the minerals on the sliding surface. The increase of the depth of the sliding surface or the increase of the soluble minerals accelerates the formation of the sliding surface. The increase of the acidity of groundwater will accelerate the water rock reaction rate, and thus accelerate the decrease of the strength of the sliding surface.

Key words: Mineral dissolution, high pressure open flow system, calcite, montmorillonite

1 引言

滑坡已逐渐发展为仅次于地震的第二大地质灾害[1]，我国 90%的滑坡都与降雨有关[2]。降雨诱发滑坡的本质是雨水转化的地下水与斜坡岩土体相互作用诱发了滑坡。水-岩（土）相互作用主要包括力学作用、物理作用和化学作用三种类型[3]，其中化学作用研究相对少。但是斜坡体是处于具有侵蚀性的水文地质环境中的，水-岩（土）化学作用（Chemical Water-Rock Interaction，CWRI）在滑坡孕育过程中具有基础性意义，因此有必要对其展开相关研究。

CWRI 包括水化、水解、溶解、离子交换以及氧化还原反应[4]，其中矿物溶解是水-岩化学作用的核心环节[5]，反应位置为颗粒或晶体内部的初始缺陷以及岩体中的节理裂隙区[6-7]。矿物溶解的影响因素有矿物因素和环境因素，矿物因素包括化学成分、结晶特性、颗粒几何、比表面积等，环境因素包括温度、地下水、pH 值和有机质等[5,8]。野外调查结果显示岩石的整体风化程度是不均匀的，同一区域岩土体风化程度也不尽相同，这表明 CWRI 具有非连续性[9]。不同矿物对地下水环境具有不同的响应特征是该现象产生原因之一，通过对单一矿物溶解反应的研究能够深化对岩土体整体溶解反应的理解。

许多学者开展了 CWRI 的室内模拟试验研究[10-11]，发现 CWRI 对岩土体的结构和强度力学性质存在显著的劣化作用。周翠英等[12]对粉砂质泥岩和泥质粉砂岩进行天然状态下的饱水试验，试验结果表明反应溶液中离子浓度变化一般服从指数曲线和反应-扩散方程曲线。赵宇等[13]将黏土和粉质黏土浸泡于不同溶液中，指出土样溶解曲线略呈“S”型，为典型的自催化反应的特征曲线。单慧媚等[14]对紫红色松散土体进行室内浸泡实验，结果表明不同浸泡条件下所发生的主要化学反应不同，并且这些反应具有时效性，逐渐减弱，最终趋于平衡。陶叶青[15]指出由于微生物作用滑带是处于还原环境中的，但在降雨时，富溶解氧雨水的入渗又

会使得还原环境变为氧化环境。有氧环境下，初期低价态变价元素被氧化，低浓度的反应溶液促使矿物溶解作用增加，析出 SO_4^{2-}和 Cl^-，这些离子与溶液中的 H^+结合，呈现酸化作用，即 pH 值逐渐降低；后期，随着硅酸盐矿物的转化和碳酸盐矿物的溶解，溶液中呈现碱化作用，即 pH 值逐渐增高；在无氧环境下，碳酸盐矿物溶解，硅酸盐矿物缓慢转化，pH 值缓慢增加。

上述研究取得了许多有益的成果，但是试验并未考虑压力的影响，并且采用的是封闭体系。滑坡体是处于地应力环境中的，压力将会对 CWRI 产生重要影响。同时，滑坡孕育过程中，降雨补给能够及时补充反应物质、运移反应生成物，促使滑带土中的化学反应远离平衡态。因此传统的常压封闭体系不能很好地反映滑带土所处的实际地质环境，而高压开放流动体系却可以克服上述不足。

本文采用高压开放流动体系对滑坡中常见矿物——方解石和蒙脱石进行矿物溶解实验研究，探索矿物在不同条件下的溶解规律，了解不同因素对溶解速率的影响效应，并分析各效应的内在作用机制。

2 实验设计

实验系统

该实验系统是由高压钛反应釜、流体泵、背压控制器、计算机显示和记录系统等组成（如图 1 所示）。高压釜的内径为 0.638cm，内孔长度为 21.6cm，反应器类型为全混流反应器（CSTR），流体泵可控制溶液流入速度（0.5~8ml/min）。

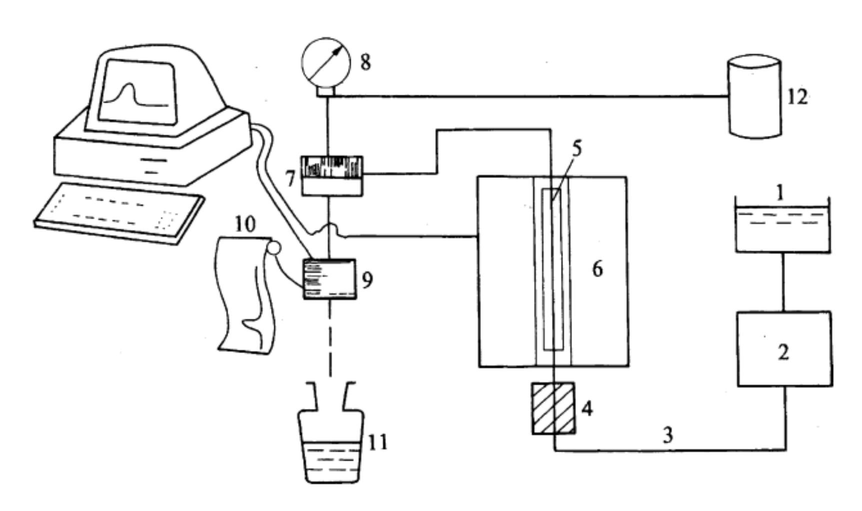


图 1 实验系统示意图[16]：1.贮液器；2.泵；3.钛管；4.预热器；5.高压釜；6.控温炉；7.反压控制器；8.压力表；9.电导仪；10.计算机控制系统；11.取样口；12.气体柱

实验样品

诸多研究表明滑带土的矿物成分主要为黏土矿物（蒙脱石、高岭石、伊利石等）和碎屑矿物（石英、方解石、长石等）。段诚仕等[16]表明黏土矿物及方解石等易发生水岩化学作用，生成次生矿物和可溶盐，进而劣化岩土体微观结构。彭三曦等[17]指出红层土体在饱水-失水过程中主要发生方解石的溶蚀作用，且反应随饱水-失水过程次数增加而增强。

本文购买高纯度的蒙脱石和方解石样品进行实验，以了解黏土矿物和碎屑矿物的溶蚀特征及规律。样品提前研磨过筛，并在丙酮中使用超声波清洁 1h，以移除矿物表面细颗粒。矿物溶蚀与矿物表面积有较大关系，本文使用美国 Micromerititics 公司 Tristar 3000 仪器对样品的表面积进行测定，方解石（20~40 目）表面积为 1.2046m^2/g，蒙脱石（10~20 目）的表面积为 26.7954 m^2/g。

控制变量

CWRI 的环境影响因素有温度、地下水 pH 值、压力、流速等，由于地表环境温差相对较小，对 CWRI 的影响并不显著，故实验将该变量设定为恒温。

滑坡体处于地应力场中，随着滑带土深度增加地应力增大。CWRI 的活跃地带为坡体内的节理裂隙区，在裂隙尖端存在显著的应力集中现象，应力集中系数为正常条件下的几倍、十几倍甚至更高[18]，所以本文设置较大的压力条件，为 1、14、28MPa。

斜坡所处的浅地表环境中，水-岩化学反应大多是在酸性条件下进行的。雨水会溶蚀空气中的 CO2，导致其 pH 值小于 7，呈现弱酸性。部分区域还存在酸雨现象，雨水 pH 值更低，文献[19]表示三峡库区酸雨最低月平均值为 3.75。此外，表层土样中由于植物根系和微生物的作用会产生一定量的 CO2 和植物酸，进而引起入渗雨水 pH 值的降低。因此，酸性条件下矿物溶蚀的 pH 效应存在重要的现实意义，本文实验中输入溶液选择 HCl 溶液和双蒸水，pH 值分别为 3.5 和 7。

斜坡中的渗流场是动态变化的，与斜坡中的地下水位、坡体内部结构以及矿物成分等均有关联。降雨期间，地下水水位不断增高，水头压力增大，流速也相应增大；坡体中的节理、裂隙等内部结构是降雨入渗的渗流通道；不同矿物对水的吸附能力不同，黏土矿物的大量存在会大大降低地下水的渗流速度。不同流速条件下，矿物的溶蚀速率具有一定差异，因此需要对流速效应加以研究，本文选择 1.00，2.00，3.00ml/min

实验方法

实验前，先测定输入溶液电导率，以便实时监测输出溶液的电导率的变化。每组平行实验中所采用样品的粒径、质量和表面积相同，温度恒定（22℃），压力恒定（P=1、14、28MPa），然后从低到高阶跃式改变流速（L=1.00，2.00，3.00ml/min）。实验进行 40min 后再开始转变流速，通过测定输出溶液电导率与时间的关系确定反应达到稳定状态。稳定 30min 后再采集输出溶液样品，每种状态采集三个样，每 20 分钟采集一个。然后使用等离子光谱（IRIS）对采集样品进行浓度和成分分析。

3 实验结果

本次实验中，将方解石分别与纯水和 HCl 溶液进行溶解反应，蒙脱石与纯水进行溶解反应。本文通过元素的浓度变化来反应矿物的溶解速率情况，对三次平行测定的实验数据求取平均值用以该状态条件下的溶解速率。方解石和蒙脱石的实验结果如表 1 和表 2 所示

表 1 方解石溶解结果（Ca2+浓度）

	pH=3.7	pH=7

流速\压强	1 MPa	14 MPa	28 MPa	1MPa
1 ml/min	9.863333	10.1	10.28333	5.24
2 ml/min	9.773333	10.36667	10.46667	5.293333
3 ml/min	9.733333	10.46667	10.56667	5.743333

表 2 pH=7，流速为 2ml/min 时蒙脱石溶解结果

压强	Ca^{2+}	Al^{3+}	Fe^{2+}	K^{+}	Mg^{2+}	Na^{+}	Si
1MPa	0.703333	1.373333	0.48	10.31	0.493333	1.25	4.11
14MPa	1.753333	9.173333	3.66	9.923333	2.313333	0.886667	18.61333
28MPa	3.676667	16.8	3.673333	7.953333	5.52	1.366667	42.6

4 讨论

压力效应

从图 2a 中可以看出方解石的溶解速率随着压强的增大而增大，方解石在 pH=3.7，流速为 3ml/min 的条件下，压强由 1MPa 提升至 28MPa，输出溶液的钙离子浓度由 9.7333mg/L 增加至 10.5667mg/L，增加了 8.56%。但值得注意的是，从图 1a 可知溶解速率随着压强的增大并非是呈线性的，方解石溶解实验中压强从 1MPa 增压至 14MPa 时，溶解速率增加 7.53%，但是当压强从 14MPa 提升至 28MPa 时，溶解速率仅增加 0.95%，提升程度显著下降，由此可见压力对溶解速率的提升存在一定的限度。

矿物溶解速率既与矿物表面的比反应晶位有关[5]，还与矿物晶体内部具有过剩表面能的位置（如位错、堆垛层错、出溶片晶边界、亚晶界及化学杂质位置等）有关[20]。固体力学化学理论中，固体所受剩余外力 ΔP 与反应位 μ 以及力学化学反应活动 $\bar{\alpha}$ 存在一定关系[21]，可表达为

$$\mu = \mu_0 + RT\ln a + \Delta PV = \mu_0 + RT\ln\bar{a} \qquad (1)$$

$$a = a\exp\frac{\Delta PV}{RT} \qquad (2)$$

式中 μ_0 为标准状态下物质的反应位（$a=1$），a 为热力学反应活动，V 为固体克分子体积。从上式可以看出，在水-岩化学作用中压力增大会引起矿物晶体反应位的增加，进而促进矿物溶解反应的进行，此为矿物溶解压力效应的内在机理。

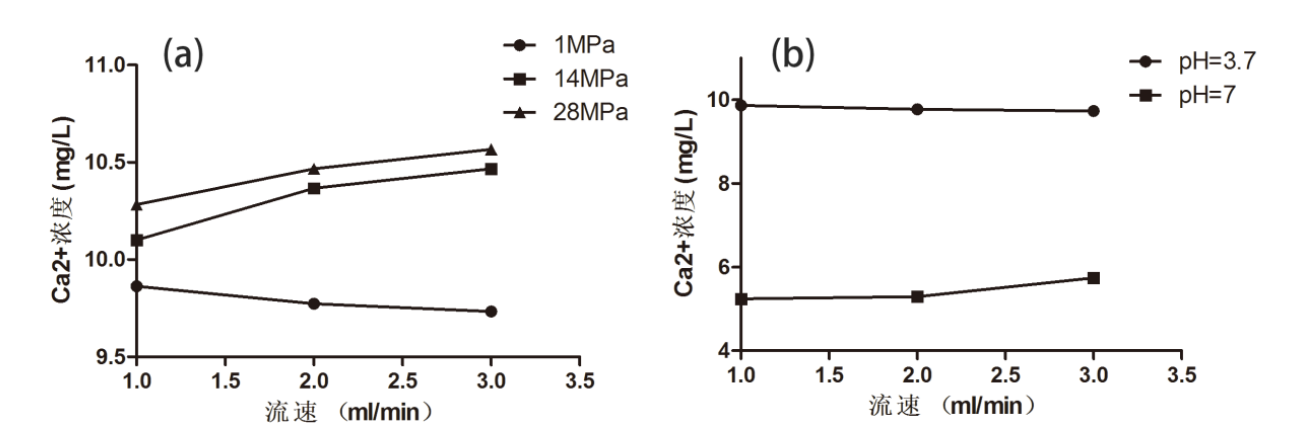


图 2 方解石溶解曲线。a. pH=3.7 时输出溶液中 Ca2+浓度与压力的关系; b. 压力=1MPa 时输出溶液中 Ca2+浓度与 pH 的关系

不同矿物对于压力的响应不同，蒙脱石的影响远远强于方解石。图 3a 是蒙脱在 pH=7，流速为 2ml/min 的条件下，输出溶液中 Ca^{2+}的浓度曲线。压强从 1MPa 提升至 28MPa，输出溶液的 Ca^{2+}浓度由 0.7033mg/L 增加至 3.6767mg/L，增加了 422.78%。而方解石在 pH=3.7，流速为 2ml/min 的条件下，压强由 1MPa 提升至 28MPa，输出溶液的钙离子浓度由 9.77 mg/L 增加至 10.47mg/L，仅增加了 7.1%。此外，在压力为 1~28MPa 条件下，方解石的溶解速率随着压力的增大而增大，但是存在一定的限度，当压力超过 14MPa 后压力效应明显减弱。而蒙脱石在压力超过 14MPa 后，压力效应反而有一定的增强。

可能的原因有三点：①矿物的晶体特性差异造成的，方解石中 Ca^{2+}的键强更高，因而对于压力的响应更弱；②蒙脱石一般以团粒的形式存在，在更高压力条件下，蒙脱石团粒逐渐解体，比表面积增大，进而能为溶解反应提供更多的表面反应位；③方解石的（20~40 目）表面积为 1.2046m²/g，蒙脱石（10~20 目）的表面积为 26.7954 m²/g，压强增加后蒙脱石由于晶格位错而增加的反应位更多。

pH 效应

从图 1b 中可以看出，反应压力为 1MPa 时输出溶液中 Ca^{2+}浓度 pH=7 的条件下明显低于 pH=3.7 的条件，当流速为 2ml/min 时析出的 Ca^{2+}浓度分别为 5.29mg/L 和 9.77mg/L。由此可见，酸性条件下矿物溶解速率与 pH 值呈负相关，这与前人的研究结果一致。

pH 效应的内在机理是溶液中的 H^+附着在晶体化学反应位的氧原子上，进而削弱金属离子与氧原子之间的键接力，促使溶解反应发生[22]。该效应与反应溶液的 H^+活度有关[23]，两者的关系可表达为

$$k_\theta \propto (a_{H^+})^{n_\theta} \qquad (0 \le n_\theta \le 1)$$

式中 k_θ 为矿物的体溶解速率，指单位时间内单位质量矿物溶解的量；a_{H^+} 为 H^+活度，pH 值越低，该值就越高；n_θ 与溶解反应的动力学机制有关。pH=3.7 的条件下，氢离子活度更高，因而反应速率更高。

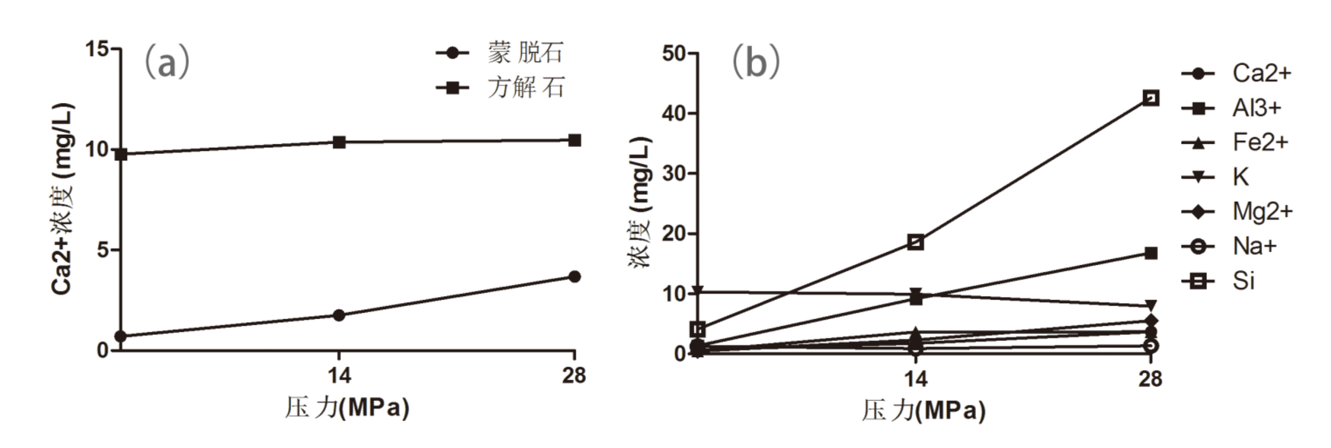


图 3 蒙脱石溶解关系曲线。a. pH=7，流速=2ml/min 时输出溶液中 Ca2+浓度与压力的关系；b. pH=7，流速=2ml/min 时输出溶液中不同离子的浓度差异

流速效应

从图 2 中，可以看出矿物溶解的流速效应是十分复杂的。在 pH=3.7，压力为 14MPa 和 28MPa 的条件下，方解石的溶解速率随着流速增大而增大。在 pH=3.7，压力为 1MPa 的条件下，方解石的溶解速率随着流速增大反而减小。然而在 pH=7 时，矿物的溶解速率近乎不随流速的变化而变化。

流速效应的内在机理与反应溶液中的 H^+活度以及反应的平衡状态有关。这主要是因为在低压力以及 pH=7 的条件下，方解石表面的反应位数量相对较少，反应总 H^+活度也相对较低，流速增加导致反应中 H^+尚未与方解石晶体中的金属离子充分反应便被运移出反应界面，使得反应活度进一步降低，进而引起溶解速率的降低。然而在高压力以及 pH=3.7 的条件下，方解石表面的反应位数量相对较多，反应总 H^+活度也相对较高。因此，流速增大时 H+仍能够与矿物反应位上的阳离子充分反应；此外，流速增大，能够运移反应生成物，促使溶解反应远离平衡状态，进而引起溶解速率的增大。

表 3 不同组分的归一化处理

	Ca^{2+}	Al^{3+}	Fe^{2+}	K^+	Mg^{2+}	Na+	Si
1MPa	0.171127	0.334144	0.116788	2.508516	0.120032	0.304136	1
14MPa	0.094198	0.492837	0.196633	0.53313	0.124284	0.047636	1
28MPa	0.086307	0.394366	0.086228	0.186698	0.129577	0.032081	1

化学成分效应

从图 3b 中可以看出，不同离子的析出浓度特征存在显著差异。析出量最多的为 Si 和 Al^{3+}，这是由于蒙脱石为铝硅酸盐，其中 Si 和 Al^{3+}为最重要的化学成分。此外，K^+的析出浓度也相对较高，这是由于 K^+所形成的化学键键强较弱，在反应时极易被析出。

随着压强增大，除 K^+外所有离子的析出速率均随压力增大而增大，呈现典型的压力效应。K^+随压力增大而降低，这是因为输出溶液采集是在反应达到稳定状态之后进行的，相同质量

的反应样品中 K^+含量相同，在高压条件下，反应速率较快，K^+在达到稳定状态之前就已经大量析出，所以测定 K^+反而随着压力的增大而减小。

对相同压力条件下的不同离子输入溶液浓度对 Si 浓度进行归一化处理，处理结果如表 3 所示。可以看出矿物溶解并不满足化学计量关系，其可能原因有：①矿物表面有新物质析出，新生成物在矿物表面沉积，使该部分矿物晶体的有效反应位数量降低，溶解反应优先在晶体其它部位进行；②次生矿物的溶解，新生成矿物的化学计量系数与初始矿物的化学计量系数并不一致；③一种或多种组分优先溶解，以及富含其它组分元素的淋滤层的形成，例如 K+形成的化学键键强较弱，会优先析出；④溶解矿物的化学分带或不均匀缺陷或杂质的存在[24]。

5 水-矿物溶蚀作用对滑面形成的意义

滑面处存在不同的矿物颗粒，不同矿物的溶解性能存在显著差异，这会产生不均匀溶解现象，促使滑面微观裂隙在溶蚀作用下逐减变大和扩展。当裂纹增大到一定程度后，由于地应力的作用将会坍塌，进而产生更多的微观裂隙，进一步促进溶蚀作用的发生。地下水的 pH 值与溶蚀速率呈负相关关系，较高的渗流速度会促进雨水入渗和地下水的排泄促，加快微观裂隙处反应溶液的更新，促进溶蚀作用的发生。在介质场、化学场和力学场的耦合作用下，滑面土体损伤不断加剧，裂纹不断扩展，最终贯通，导致滑坡发生。

由此可知，滑面处的溶蚀作用将引起滑面的微观结构显著变化，造成滑面土体损伤和滑面强度弱化。上述溶蚀规律揭示：滑面深度、矿物种类、地下水的酸碱度以及渗流速度等共同决定着滑面上矿物溶蚀特征。滑面深度的增加或易溶蚀矿物的增加，加速滑坡的发生和发展的动力学过程。地下水的酸度增加会加速水-岩反应速率，从而加速滑面强度的降低，促进滑坡的形成。

6 结论

通过对高压开放流动体系中方解石和蒙脱石的溶解实验研究，可以得到如下结论：

1）矿物溶解速率随着压力的增大而增大，但是压力对溶解的提升存在一定的限度。不同矿物对于压力的响应不同，蒙脱石的影响远远强于方解石。在 CWRI 中压力增大会引起矿物晶体反应位的增加，进而促进矿物溶解反应的进行。

2）酸性条件下矿物溶解速率与 pH 值呈负相关，内在机制与反应溶液的 H^+活度有关。

3）矿物溶解的流速效应十分复杂，受压强、pH 和矿物种类的影响，内在机制与反应溶液中的 H+活度以及反应的平衡状态有关。

4）矿物溶解不满足化学计量关系，可能的原因有矿物表面有新物质析出、次生矿物的溶解、存在优先溶解现象以及存在化学分带、不均匀缺陷或杂质。

5）滑面深度、矿物种类、地下水的酸碱度以及渗流速度等共同决定着滑面上矿物溶蚀特征。滑面处的溶蚀作用将引起滑面的微观结构显著变化，造成滑面土体损伤和滑面强度弱化。

参考文献：

[1]. 段永侯, 我国地质灾害的基本特征与发展趋势. 第四纪研究 1999, (03), 208-216.

[2]. 李媛; 孟晖; 董颖; 胡树娥, 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析. 中国地质灾害与防治学报 2004, (02), 32-37.

[3]. 仵彦卿, 地下水与地质灾害. 地下空间 1999, (04), 303-310+316-339.

[4]. 徐则民; 黄润秋; 范柱国, 滑坡灾害孕育—激发过程中的水-岩相互作用. 自然灾害学报 2005, (01), 1-9.

[5]. 徐则民; 黄润秋; 唐正光, 硅酸盐矿物溶解动力学及其对滑坡研究的意义. 岩石力学与工程学报 2005, 24 (9), 1479-1491.

[6]. 陈四利; 冯夏庭; 李邵军, 化学腐蚀对黄河小浪底砂岩力学特性的影响. 岩土力学 2002, (03), 284-287+296.

[7]. 汤连生; 周萃英, 渗透与水化学作用之受力岩体的破坏机理. 中山大学学报(自然科学版) 1996, (06), 96-101.

[8]. 陈积普. 水岩化学作用过程及其对滑坡孕育的贡献. 硕士, 昆明理工大学, 2006.

[9]. 王志兵; 申林方; 徐则民, 头寨滑坡地下水化学特征及其反映的水-岩(土)相互作用. 水文地质工程地质 2016, 43 (01), 111-116+123.

[10]. 汤连生; 张鹏程; 王思敬, 水-岩化学作用之岩石断裂力学效应的试验研究. 岩石力学与工程学报 2002, (06), 822-827.

[11]. André, L.; Rabemanana, V.; Vuataz, F.-D., Influence of water–rock interactions on fracture permeability of the deep reservoir at Soultz-sous-Forêts, France. Geothermics 2006, 35 (5).

[12]. 周翠英; 邓毅梅; 谭祥韶; 林春秀; 温少荣, 软岩在饱水过程中水溶液化学成分变化规律研究. 岩石力学与工程学报 2004, (22), 3813-3817.

[13]. 赵宇; 何淑芬; 崔鹏, 用固体力学化学理论研究岩土的力学化学行为——以成都龙泉紫色土为例. 自然灾害学报 2002, (02), 70-74.

[14]. 单慧媚; 彭三曦; 梁和成; 李义连, 紫红色松散土体在不同饱水环境中的化学反应特征试验研究. 水文地质工程地质 2018, 45 (05), 136-142.

[15]. 陶叶青. 红层地区滑坡滑带处水—岩(土)化学作用研究. 成都理工大学, 2017.

[16]. 段诚仕; 杨何; 邱禹, 地下水对土体结构特征及力学强度影响研究. 甘肃水利水电技术 2018, 54 (08), 25-27+37.

[17]. 彭三曦; 单慧媚; 梁和成; 蔡鹤生; 李义连, 三峡库岸红层土体饱水失水过程中水土化学作用研究. 桂林理工大学学报 2017, 37 (03), 444-450.

[18]. 赵宇. 滑面力学化学形成机理的实验研究. 中国科学院研究生院, 2005.

[19]. 杨贤为; 邹旭恺; 马天健, 长江三峡库区酸雨分布特征分析. 气象 2002, (10), 14-18.

[20]. Holdren, G. R.; Speyer, P. M., Reaction rate-surface area relationships during the early stages of weathering. II. Data on eight additional feldspars. Geochimica et Cosmochimica Acta 1987, 51 (9), 2311-2318.

[21]. 赵宇, 滑坡裂面形成的力学化学自催化作用研究初探. In 海峡两岸山地灾害与环境保育学术讨论会第一卷, 成都, 1998; p 278～282.

[22]. Welch, S. A.; Ullman, W. J., The effect of organic acids on plagioclase dissolution rates and stoichiometry. Geochimica et Cosmochimica Acta 1993, 57 (12), 2725-2736.

[23]. Zhang, R.; Hu, S.; Zhang, X., Experimental Study of Dissolution Rates of Fluorite in HCl–H2O Solutions. Aquatic Geochemistry 2006, 12 (2), 123-159.

[24]. Zhang, R.; Zhang, X.; Guy, B.; Hu, S.; de Ligny, D.; Moutte, J., Experimental study of dissolution rates of hedenbergitic clinopyroxene at high temperatures: dissolution in water from 25 °C to 374 °C. European Journal of Mineralogy 2013, 25 (3), 353-372.